

Special Feature: Laser Beam Technology

LD Array Light Concentration

using a Prism Array

Satoshi Yamaguchi

5 Process Technology Research Lab. *, Nippon Steel Corporation

Tetsuro Kobayashi, Yoshimasa Saito, Koichi Chiba

EI Division, Nippon Steel Corporation

* 5-10-1 Fuchinobe, Sagamihara-shi, Kanagawa-ken 229

Tel. 0427-68-6136

10 1. Introduction

Laser diodes (LDs) have a higher efficiency of conversion to light than solid state lasers or gas lasers, and are thus promising as light sources for utilizing light energy with high output power. With such laser diodes, to obtain a high output power, an array-type structure in which a large number of minute LD elements are arranged in an array is used. When using such an LD array, an important factor is that it be possible to narrow down the light emitted from the LD array into a minute spot. Technology for narrowing down into a minute spot is important not only in the case of using the LD light directly, but also when using the laser diodes as a light source for pumping a solid state laser. The reason for this is that when pumping a solid state laser using laser diodes, the end pumping method is better than the side pumping method in terms of efficiency. However, with an LD array, a large number of active layer stripes

(emitters), which are the LD elements, are arranged in a one-dimensional array, and hence usage is difficult.

As a method of concentrating light from an LD array, there is a method using a lens array. For example, we have previously developed a GRIN (gradient index lens) lens array¹⁾⁻³⁾. GRIN lenses ($f=1.78\text{mm}$) were cut out thinly lengthways so that the width thereof was the same as the pitch of the LD elements ($800\mu\text{m}$), and then the lens elements were stuck on in the same number as the number of LD elements (12) to form a lens array. The LD elements and the GRIN lens elements were made to correspond to each other one-to-one, and first the light emitted from each LD element was concentrated separately using the corresponding GRIN lens element. Then, narrowing down was carried out using a focusing lens (an aspherical lens with $f=15.5\text{mm}$), thus superimposing all of the beam elements in one place. At this time, a beam spot is obtained having a size (1.74mm) obtained by multiplying the width of the stripes ($200\mu\text{m}$) by a multiplying factor determined from the focal length of the GRIN lenses (collimators) and the focal length of the focusing lens. To make the multiplying factor smaller and thus make the diameter of the beam spot smaller, it is necessary to select lenses with as long a focal length as possible as the collimators. However, it is necessary place the collimator lenses on the near side of the position where the beams emitted from adjacent LD elements (total angle

of divergence of beam approximately 10°) start to overlap with one another (approximately 3.43mm from the light-emitting end of the active layer stripes), and hence there is no option but to use lenses with a short focal length.

5 As a result, there is a limit to how small the diameter of the beam spot obtained can be made. If collimator lenses having a long focal length could be placed a long way from the LD array while avoiding overlapping of the beams, then a minute beam spot could be obtained.

10 The angle of radiation of the LD emitted light differs between the component parallel to the active layer and the component perpendicular to the active layer, and the beam quality of the emitted light also differs greatly between the parallel component and the perpendicular component.

15 Moreover, the larger the output power, the greater this difference. Regarding the direction perpendicular to the active layer, the aperture of the emitted light is narrow (approximately $1\mu\text{m}$), and hence the beam quality is high, with light virtually at the diffraction limit being produced.

20 Consequently, regarding the perpendicular component, there is no need to collimate with lenses having a long focal length, and it is possible to narrow down sufficiently even if the collimation is carried out close to the LDs. The problem is with regard to the parallel component. Regarding the
25 direction parallel to the active layer, the aperture of the emitted light is broad ($100\sim 200\mu\text{m}$), and hence it is

preferable to carry out the collimation at a position as far away as possible. If one could first collimate the perpendicular component at a position close to the LD array, and then rotate each of the beams to interchange the parallel component and the perpendicular component before adjacent beams from the stripes start to overlap with one another, then the cylindrical lens that collimates the component parallel to the active layer could be placed a long way from the LD array.

We manufactured a prism array as an optical element having a function of being able to rotate each of the beams and thus interchange the parallel component and the perpendicular component through totally reflecting three times.

2. Structure of Prism Array

Fig. 1 shows schematically the row of beams that have exited from the LD array in the z-axis direction entering the prism array, being converted, and exiting the prism array^{4),5)}. In actual practice, there is a cylindrical microlens that collimates the perpendicular component (y component) between the LD array and the prism array, but this has been omitted for the sake of simplicity. Through the prism elements that make up the prism array, the light exiting from each of the active layer stripes of the LD array is rotated by 90°, thus interchanging the parallel component (x component) and the perpendicular component (y component).

As shown in Fig. 2, each prism element is an oblique prism. The characteristics of the oblique prism are that the two parallel faces π_1 and π_2 are isosceles trapezoids having internal angles of 45° , the two parallel faces σ_2 and ρ are parallelograms having internal angles of $\tan^{-1}(1/\sqrt{2})$, the faces σ_1 and σ_3 are parallelograms having internal angles of $\tan^{-1}\sqrt{2}$, the faces π_1 and π_2 intersect the faces σ_2 and ρ at right angles, the angle formed between each pair of the three faces σ_1 , σ_2 and σ_3 is 60° , and the angle formed between the faces π_1 and σ_1 and between the faces σ_3 and π_2 is 45° . The face π_1 is the face of entry of the beam, the face π_2 is the face of exit, and the faces σ_1 , σ_2 and σ_3 are the faces of the first, second and third total reflections respectively. Moreover, when forming the array, ρ and the face σ_2 of the adjacent prism element are stuck together with their top edges being lined up with one another. If the face π_1 and the face σ_1 are placed with a vertical orientation, then the angle between the face σ_2 and a horizontal plane is 45° , and the angle between the face σ_3 and the face of entry π_1 is 135° . The length p of the edge between the face σ_3 and the face π_2 (or π_1) is the pitch of the prism array, which is equal to the pitch of the stripes in the LD array. The beam entering each prism element undergoes total reflection three times, and is rotated by 90° about the optical axis, and hence is converted into a beam for which the vertical component (y component) and the

horizontal component (x component) are interchanged. A flat beam orientated in a horizontal direction enters the face π_1 with an angle of incidence of 0° , undergoes total reflection through a right angle at the faces σ_1 , σ_2 and σ_3 , proceeding rightwards, upwards and forwards, and becomes a flat beam orientated in the vertical direction and exits from the prism element. The optical axis of the entering light and the optical axis of the exiting light are parallel to one another. As shown in Fig. 1, the beams from the stripes, which are arranged in series in the form of a dashed line, pass through the prism array, whereupon they are converted into a parallel arrangement having the form of a ladder.

3. Manufacture of the Prism Array

We manufactured prism elements of $p=800\mu\text{m}$ by cutting BK7 glass. In Fig. 2, the length of the edge between the face π_1 and the face ρ was made to be $2p\sqrt{2}$, and the length of the edge between the face π_1 and the face σ_2 was made to be $3p\sqrt{2}$. Moreover, the distance between the two parallel faces π_1 and π_2 was made to be $2p$. With placement as shown in Fig. 2, the width (x-axis direction) and height (y-axis direction) of each prism element were each 4mm, and the depth (z-axis direction) was 1.6mm. The width and height of the face of entry π_1 was 2.4mm. Adjacent prism elements were bonded to one another using an acrylic adhesive. As shown in Fig. 1 and Fig. 2, the array was made such that the faces of entry π_1 of the prism elements lay in the same plane,

and the faces of the third total reflection σ_3 of the prism elements lay in the same plane. In Fig. 2, for convenience in explaining the functioning of the prism elements, the figure has been drawn such that the three total reflections all occur inside a single prism element; but in actual practice, with this constitution, after the second total reflection has occurred, the beam, which is traveling upwards, hits the face p without hitting the face σ_3 . The beam is then not internally reflected at the bonding face (the face p), but rather passes through into the adjacent prism element. A beam that entered one prism element thus undergoes the third total reflection at the face σ_3 of the next but one prism element and then exits from the face π_2 of this element, and hence the number of prism elements in the prism array must be two more than the number of LD stripes. We manufactured a prism array with 14 prism elements arranged in a one-dimensional array for an LD array comprising 12 stripes. The total width of the prism array (x-axis direction) of the prism array was thus 14.4mm, and the width of the faces of entry was 12.8mm. Furthermore, although not shown in the figures, considering the handling of the prism array, the faces of exit π_2 of the prism array were bonded onto a flat glass substrate to make assembly easier. The exiting beams travel in a direction parallel to the entering beams, but there is a shift of each optical axis of $p/2$ ($=0.4\text{mm}$) in the horizontal direction (x-axis direction) and $5p/2$ ($=2\text{mm}$)

in the vertical direction (y-axis direction).

4. Light-Concentrating Optical System

As shown in Fig. 3, the light-concentrating optical system of the LD array is constituted from a cylindrical microlens, a cylindrical lens and a focusing lens, in addition to the prism array⁴⁾. The LD array used was one having a wavelength of 808nm, a CW output power of 10W, and a total width of 1cm (Spectra Diode Laboratories: SDL-3490S). The LD array was mounted on an aluminum heat sink that was connected to a thermoelectric cooler, and the temperature was kept constant during operation. The LD array comprises 12 stripes of width 200 μ m arranged at a pitch of 800 μ m. Each stripe has a 50 μ m gap in the center thereof and, precisely speaking, comprises two AlGaAs diodes, but essentially a single beam is produced. The beam profile of the beam exiting from each stripe is a typical Gaussian in the direction perpendicular to the active layer (the y component); but has a dip in the center in the direction parallel to the active layer (the x component). The angle of divergence of the beam exiting each stripe is 30° (FWHM) in the direction perpendicular to the active layer (the y-axis direction) and 10° (FWHM) in the direction parallel to the active layer (the x-axis direction). Regarding the 12 beams exiting the LD array, the component perpendicular to the active layer (the y component) is first collimated using the cylindrical microlens, which is placed 0.5mm away from the LD stripes.

The row of beams then undergoes conversion through the prism array, which is positioned right next to the cylindrical microlens, and then the component parallel to the active layer (the x component), which has now been converted to
5 be in the y-axis direction, is collimated using the cylindrical lens ($f=44.5\text{mm}$). Finally, both components are narrowed down together using the focusing lens (an aspherical lens of $f=26.5\text{mm}$), which is positioned 60mm away from the prism array, whereupon the 12 beams are superimposed in a
10 single place, and hence a minute beam spot is obtained.

Text in Figures

Fig. 1: The multi-prism array and the conversion of beams emitted from the LD array (the prism array comprises 14 prism
15 elements, and the LD array comprises 12 stripes)

Exiting light

Prism array

LD array

20 Fig. 2: An oblique prism (prism element) and conversion of a flat beam

Entering light

Fig. 3: Schematic drawings of the optical system for
25 collimating and focusing the emission from the LD array comprising 12 stripes.

(a) Top view parallel to the active layer

(b) Side view perpendicular to the active layer

LD array

Prism array

5 Focusing lens

Cylindrical microlens

Cylindrical lens

0236 2月9日号から
記載の了解

プリズムアレイによる LDアレイの集光

新日本製鉄株式会社 プロセス技術研究所*

山口 哲

新日本製鉄株式会社 田事業部

小林 哲郎, 高藤 吉正, 千葉 宏一

1. はじめに

半導体レーザー (LD: Laser Diode) は固体レーザーやガスレーザーに比べて光への変換効率が高いので、高出力化して光エネルギーを利用するための光源としても期待されている。こうした半導体レーザーは、高出力を得るため、多数の微小なLD要素が配列したアレイ型の構造となっている。このようなLDアレイを利用するとき、LDアレイからの出射光を微小スポットに絞り込めることは重要な要素である。LD光を直接利用する場合だけでなく、固体レーザーの励起光源として半導体レーザーを利用するときにも、微小スポットに絞り込む技術は重要である。なぜなら、半導体レーザーを用いて固体レーザーを励起する場合、側面励起方式に比べて端面励起方式の方が効率の点で有利だからである。しかしながら、LDアレイはLD要素である活性層ストライプ (エミッター) が1次元的に多数配列しているため、その利用を難しくしている。

LDアレイを集光する方法にレンズアレイによる方法がある。例えば、われわれはかつて、GRIN (分布屈折率) レンズアレイを開発した^{1)~3)}。GRINレンズ ($f=1.78\text{mm}$) をLD要素の配列ピッチと同じ幅 ($800\mu\text{m}$) になるように縦に薄く切り出し、このようなレンズ要素をLD要素の数と同じ枚数 (12枚) だけ張り合わせてレンズアレイとした。各LD要素と各GRINレ

ンズ要素を1対1に対応させ、まず各LD要素からの出射光を別々に各GRINレンズ要素で集光した。ついで、フォーカシングレンズ ($f=15.5\text{mm}$ の非球面レンズ) を用いて絞り込み、各ビーム要素を1か所に重ね合わせた。このとき、ストライプの幅 ($200\mu\text{m}$) にGRINレンズ (コリメーター) の焦点距離とフォーカシングレンズの焦点距離とで決まる倍率を掛けた大きさ (1.74mm) のビームスポットが得られる。倍率を小さくしてビームスポット径を小さくするには、コリメーターとしてなるべく焦点距離の長いレンズを選ぶ必要がある。ところが、コリメーターレンズは隣り合うLD要素からの出射ビーム (ビーム拡がり全角 $\sim 10^\circ$) が重なり始める位置 (活性層ストライプの出射端から $\sim 3.43\text{mm}$) より手前に置く必要がある。このためレンズの焦点距離も短いものを使用せざるをえない。その結果、得られるビームスポット径の微小さにも限度がある。もし、ビームの重なり合いを避けて、焦点距離の長いコリメーターレンズをLDアレイから離して配置できれば、微小なビームスポットを得ることができる。

ところで、LD出射光の放射角は活性層に平行な成分と垂直な成分とで異なっており、出射光のビーム品質も平行成分と垂直成分とで大きく違う。そして、出力が大きくなるほどこの違いは大きくなる。活性層に垂直な方向については出射光のアパーチャーが狭い ($\sim 1\mu\text{m}$) のでビーム品

原研字大
記す

* 〒229 神奈川県横浜市瀬野辺5-10-1 田0427-68-6136

質が高くほぼ回折限界光を与える。したがって、垂直成分については焦点距離の長いレンズでコリメートする必要はなく、LDに近接してコリメートしても十分に細く絞ることができる。問題は平行成分についてである。活性層に平行な方向については出射光のオーバーチャージが広い(100~200 μm)ので、なるべく離れた位置でコリメートするのが望ましい。そこで、まずLDアレイに接近した位置で垂直成分をコリメートし、ついでストライプからの隣合うビームが重なり始める前に各々のビームを回転して平行成分と垂直成分を入れ替えることができれば、活性層に平行な成分をコリメートするシリンドリカルレンズはLDアレイから離して配置することができる。

われわれは、3回の全反射により、おののビームを回転して平行成分と垂直成分を入れ替えることができる機能を有する光学素子として、プリズムアレイを作製した。

2. プリズムアレイの構造

図1に、LDアレイから z 軸方向に出射したビーム列がプリズムアレイに入射し、変換されて出射していく様子を模式的に示す^{4,5)}。実際にはLDアレイとプリズムアレイとの間には垂直成分(y 成分)をコリメートするシリンドリカルマイクロレンズがあるが、簡単のため省略してある。プリズムアレイを構成する各プリズム素子によりLD

アレイの活性層ストライプからのおのの出射光が90°回転し平行成分(x 成分)と垂直成分(y 成分)とが入れ替わる。図2に示すように、各プリズム素子は斜角柱からなる。この斜角柱の特性を記すと、平行な2面 π_1 、 π_2 は内角が 45° の二等辺台形；平行な2面 σ_2 、 ρ は内角が $\tan^{-1}(1/\sqrt{2})$ の平行四辺形；面 σ_1 、 σ_3 は内角が $\tan^{-1}\sqrt{2}$ の平行四辺形；面 π_1 、 π_2 は面 σ_2 、 ρ と直交；3つの面 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 の互いになす角は 60° ；面 π_1 と面 σ_1 および面 σ_3 と面 π_2 のなす角は 45° である。面 π_1 はビームの入射面、面 π_2 は出射面であり、面 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 はそれぞれ第1、第2、第3全反射面である。また、アレイにすると、 ρ と隣接するプリズム素子の面 σ_2 は上辺を揃えて貼り合わせられる。面 π_1 および面 σ_1 を垂直の向きに置くと、面 σ_2 と水平面とのなす角は 45° であり、面 σ_3 と入射面 π_1 とのなす角は 135° である。面 σ_3 と面 π_2 (または π_1)とがなす辺の長さ p はプリズムアレイの配列ピッチ、つまり、LDアレイのストライプの配列ピッチに等しい。プリズム素子に入射したビームは全反射を3回行い、光軸の回りに90°回転して、垂直成分(y 成分)と水平成分(x 成分)とが入れ替わったビームに変換される。水平方向を向いたフラットビームが入射角 0° で面 π_1 に入射し、面 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 で直角に全反射して右方、上方、前方へと進んで、垂直方向を向いたフラットビームになりプリズム素子から出射する。入射

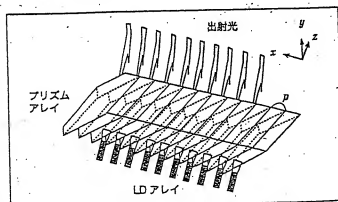


図1 マルチプリズムアレイとLDアレイから放射されたビームの変換(プリズムアレイは14個のプリズム素子から、LDアレイは12個のストライプからなっている)

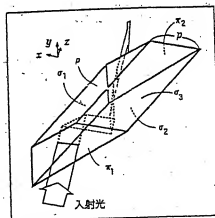


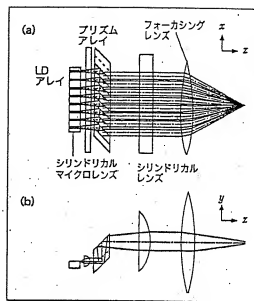
図2 斜角柱プリズム(プリズム素子)とフラットビームの変換

特集：レーザービーム技術

光の光軸と出射光の光軸とは平行である。図1に示すように、破線状に直列して配列したストライプからのビームはプリズムアレイを通り抜けると梯子状に並列した配列に変換される。

3. プリズムアレイの作製

われわれは $p = 800\mu\text{m}$ のプリズム素子をBK7ガラスを削って作製した。図2において、面 π_1 と面 ρ がなす辺の長さを $2p\sqrt{2}$ 、面 π_1 と面 σ_2 がなす辺の長さを $3p\sqrt{2}$ とした。また、平行な2面 $\pi_1 - \pi_2$ 間の距離を $2p$ とした。図2のような配置で、プリズム素子の幅 (x軸方向) と高さ (y軸方向) は4mm、奥行き (z軸方向) は1.6mmである。なお、入射面 π_1 の幅と高さは2.4mmである。隣り合うプリズム素子はアクリル系の接着剤を用いて接着した。図1および図2に示すように、各プリズム素子は入射面 π_1 および第3全反射面 σ_3 をそれぞれ同一面内に揃えて配列した。図2ではプリズム素子の機能の説明の都合上1つのプリズム素子内で3回の全反射を行うように描いたが、実際には、この構成では2回目の全反射を行ったあと上方に伝播するビームは面 σ_3 をヒットせず面 ρ をヒットする。そして、ビームは接着面 (面 ρ) で内部反射せず隣のプリズム素子に通る。あるプリズム素子に入射したビームは2番隣のプリズム素子の面 σ_3 で3度目の全反射を行ってその素子の面 π_2 から出射するので、プリズムアレイにはLDストライプの数より2つ多いプリズム素子が必要である。われわれは、12個のストライプからなるLDアレイに対応して、14個のプリズム素子が1次元アレイに配列したプリズムアレイを作製した。したがって、プリズムアレイの全体の幅 (x軸方向) は14.4mm、入射面の幅は12.8mmである。さらに、図には示していないが、プリズムアレイのハンドリングを考えると、ガラスの平面基板にプリズムアレイの出射面 π_2 を貼り付け光学系を組みやすいようにした。出射ビームは入射ビームに対して平行移動しているが、それらの光軸のずれは、水平方向 (x軸方向) に $p/2 (= 0.4\text{mm})$ 、垂直方向 (y軸方向)



(a) 活性層に平行な平面図
(b) 活性層に垂直な側面図
図3 12本のストライプからなるLDアレイの放射をマイクロメートルおよびフォーカシングする光学系の模式図

に $5p/2 (= 2\text{mm})$ である。

4. 集光光学系

LDアレイの集光光学系は、図3に示すように、プリズムアレイに加えて、シリンドリカルマイクロレンズ、シリンドリカルレンズ、およびフォーカシングレンズから構成される。LDアレイとして、波長808nm、CW出力10W、全体の幅1cmのもの (Spectra Diode Laboratories: SDL-3490-S) を用いた。LDアレイは電子冷却器に連結したアルミニウムヒートシンクにマウントし、運転時には温度を一定に保った。LDアレイはピッチ800 μm で配列した幅200 μm のストライプ12本からなる。各々のストライプは中央に50 μm の間隙があり正確には2個のAlGaAsのダイオードからできているが、実質的に1本のビームを与える。ストライプから出射したビームのビームプロファイルは活性層に垂直な方向 (y成分) では典型的なガウシアンを与えるが、活性層に平行な方向 (x成分) では中央にくぼみを有する。ストライプから出射したビームの拡がり角は活性層に垂直な方向 (y軸方向) について30°

(FWHM)、活性層に平行な方向 (x 軸方向) について 10° (FWHM) である。LD アレイから出射した 12 本のビームは、LD ストライプから 0.5mm 離れたところに配置したシリンドリカルマイクロレンズにより、その活性層に垂直な成分 (y 成分) がまずコリメートされる。ビーム列はシリンドリカルマイクロレンズから至近距離の位置に配置したプリズムアレイにより変換され、ついで、 y 軸方向に変換された活性層に平行な成分 (x 成分) がシリンドリカルレンズ ($f=44.5\text{mm}$) によりコリメートされる。最後に、プリズムアレイから 60mm の位置に配置したフォーカシングレンズ ($f=26.5\text{mm}$ の非球面レンズ) により両成分が一括して絞り込まれ、12 本のビームが同一か所に重なり合って微小なビームスポットが得られる。

5. 集光特性

写真 1 は、LD アレイから出射した光をシリンドリカルマイクロレンズでコリメートし、プリズムアレイで変換した後の、12 本のビームの活性層に平行な方向 (x 軸方向) についてビームプロファイルである。プリズムアレイから 20mm 離れた位置においてビームプロファイラ (Photon, Inc.: BeamScan) を用いて測定した。このプロファイルの 1 本 1 本のピークには LD アレイの各ストライプが対応するが、おのおの峰にはプリズムアレイで変換される前のもとも活性層に垂直な方向 (y 軸方向) に出射した成分のプロフ

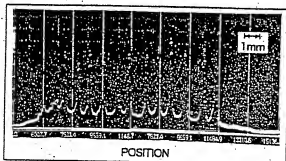
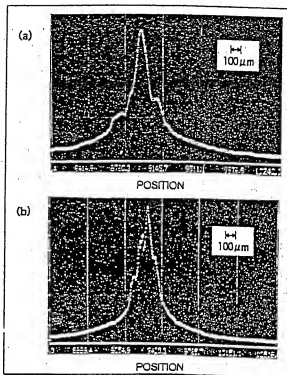


写真 1 プリズムアレイ透過後の LD アレイからの 12 本のコリメートされたビームのビームプロファイル (活性層に平行な成分 (x 軸方向))



(a) 活性層に平行な成分 (x 軸方向) (FWHM=180 μm)
(b) 活性層に垂直な成分 (y 軸方向) (FWHM=205 μm)
写真 2 フォーカシングレンズによる LD アレイの 12 本のフォーカスされたビームのビームプロファイル

イルが表れている。プリズムアレイで変換された後、さらにシリンドリカルレンズでコリメートした 12 本のビームを、フォーカシングレンズで絞り込んだビームスポットのビームプロファイルを写真 2 に示す。(a) および (b) はそれぞれ活性層に平行 (x 軸方向) および垂直 (y 軸方向) な方向について測定したビームウェイトにおけるプロファイルであり、ビーム径 180 μm および 205 μm (FWHM) が得られた。このように、LD アレイから出射したビームはストライプの幅と同程度の大きさで (200 μm FWHM) のスポットにフォーカスされた。ビームスポットにおける光は活性層に垂直な方向に直線偏光しているが、これは活性層に平行に偏光していた各々のビームの 90° 回転によるものである。LD アレイの出力 10W に対してフォーカシングレンズ後の出力は 7.6W であり、シリンドリカルマイクロ

特集：レーザービーム技術

ンズ、プリズムアレイ、シリンドリカルレンズ、フォーカシングレンズの透過を含めたカップリング効率は76%であった。

GRINレンズアレイを用いた場合はLDアレイの10W出力をフォーカスするのに86%のカップリング効率であった²⁾。プリズムアレイの場合はGRINレンズアレイに比べて、集光光学系においてオプティクスの面が余分に4面多いこと、プリズムアレイ内に余分に反射面が3面あることが透過率を下げる要因となっている。しかしながら、異なる特性のLDアレイに対するものではあるが、ビーム径が $\sim 900\mu\text{m}$ （ストライプ数20、ストライプ幅 $100\mu\text{m}$ 、配列ピッチ $500\mu\text{m}$ ）のLDアレイに対応して作製したGRINレンズアレイを用いた例²⁾にしか絞れなかったGRINレンズアレイの場合に比べると光パワー密度は約18倍高い。

6. 固体レーザーの端面励起

プリズムアレイを光結合器として用いたLDアレイ端面励起固体レーザーの模式図を図4に示す³⁾。レーザーロッド（長さ8mm、直径3mm）自身はもうひとつの電子冷却器に連結したアルミニウムヒートシンクにマウントし温度一定に保った。図4中Nd:YAGロッドの左側端面は808nmの励起光波長に対し高透過、1064nmのレーザー発振波長に対して高反射のコーティングが施されている。右側端面は1064nmに対して高透過である。LDアレイで励起してCWおよびQスイッチ発振を行った。CW発振の場合、レ

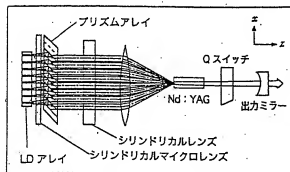
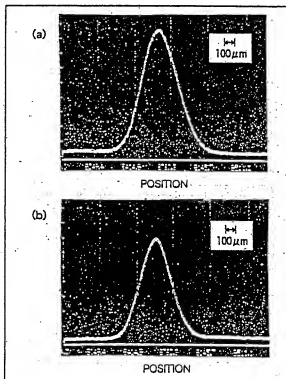


図4 プリズムアレイを用いて集光したLDアレイ光によるNd:YAGレーザーの端面励起

ーザー共振器はNd:YAGロッドの左側端面と出力ミラー（曲率半径500mm、 $\lambda = 1064\text{nm}$ での反射率95%）とで構成され、共振器長は90mmとした。Qスイッチ発振の場合、出力ミラーは曲率半径1000mm、反射率92.5%とし、共振器内にAO（音響光学）Qスイッチ素子を挿入した。

励起実験の結果、LDアレイの出力に対し、Nd:YAGレーザーのCW発振のしきい値は1.24W、スロープ効率は35%であった。そしてLDアレイ出力10Wに対し3WのYAG出力が得られた。励起光はマルチビームでありながら、スロープ効率はシングルビームで励起した場合と変わらなかった。出力ミラーから80mmの位置におけるNd:YAGレーザー光のビームプロファイルを写真3に示す。(a)が水平成分(x成分)、(b)は垂直成分(y成分)である。ビーム品質については、水平成分に対し $M^2 = 1.76$ 、垂直成分に対



(a) 活性層に平行な成分 (x 軸方向)
(b) 活性層に垂直な成分 (y 軸方向)

写真3 LDアレイ励起Nd:YAGレーザー光のビームプロファイル（フォーカスされていない）

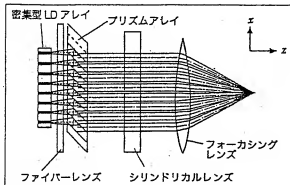
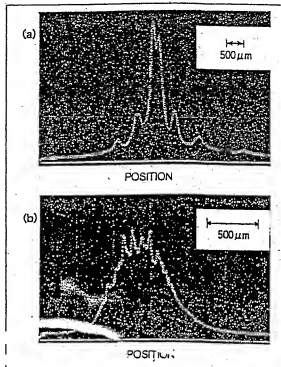


図5 プリズムアレイによる密集型LDアレイ光の集光

し $M^2 = 1.29$ が得られた。端面励起方式では、励起光は共振器モードとのマッチングが重要である。この場合には、励起光のビームスポット径は $542 \times 207 \mu\text{m}$ であった。また、Qスイッチ動作（繰返し周波数 1kHz ）でパルス幅 25.2ns (FWHM) が得られた。

7. 密集型LDアレイへの適用

これまでに使用したLDアレイはストライプの配列が離散的であった。そして、プリズムアレイはストライプの配列ピッチに対してプリズム素子を配列すればよかった。しかし、LDアレイのなかに、幅が狭く配列ピッチも非常に小さいものもある。このような、プリズム素子を1対1に対応させることができない密集型のストライプ配列からなるLDアレイに、プリズムアレイをそのまま適用することを試みた⁹⁾。図5に光学系の模式図を示す。用いた密集型LDアレイは $80\mu\text{m}$ 幅の100本の活性層ストライプがピッチ $100\mu\text{m}$ で配列した構造を有する (Northeast Semiconductor, Inc.: 701C15-809)。一方、プリズム素子はピッチ $800\mu\text{m}$ で配列しているので、1個のプリズム素子に8本の活性層ストライプが対応することになる。ここでは、活性層と垂直な方向の出射光成分 (y成分) のコリメーターとしてファイバーレンズを用いたが、機能はシリンダリカルマイクロレンズと同じである。こうしてコリメートしたLDアレイ光をフォーカシングレンズで絞って得られたスポットのビームプロファイル



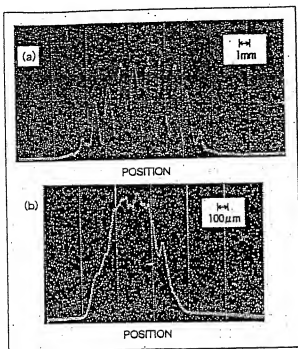
(a) 活性層に平行な成分 (x軸方向) (FWHM = $390\mu\text{m}$)

(b) 活性層に垂直な成分 (y軸方向) (FWHM = $546\mu\text{m}$)

写真5 プリズムアレイで集光した密集型LDアレイ光のビームプロファイル

ルを写真5に示す。活性層に平行 (x成分) および垂直 (y成分) な成分について、各々、ビームスポット径 $390\mu\text{m}$ および $546\mu\text{m}$ (FWHM) が得られた。

比較実験のため、同じ密集型LDアレイからの出射光をGRINレンズアレイ (幅 $800\mu\text{m}$, $f = 1.78\text{mm}$ のGRINレンズが12個から構成) を用いてコリメートした。フォーカシングレンズ ($f = 26.5\text{mm}$ の非球面レンズ) で絞ったビームスポットのプロファイルを写真5に示す。(a) に示すように、活性層に平行な成分について全体の幅は 10mm 以上になり、そのなかに8つの主要ピークが観測される。これはGRINレンズの幅 $800\mu\text{m}$ のなかに8本のストライプ光が入射することに対応する。12個のGRINレンズからは8本ずつのビームが出射するが、フォーカシングレンズにより重なり合って8本のメインピークを与える。このようにレンズアレイよりも、直径 $\sim 500\mu\text{m}$ のス



(a) 活性層に平行な成分 (x軸方向)
(b) 活性層に垂直な成分 (y軸方向)
写真5 GRINレンズアレイで集光した密集型LDアレイ光の
ビームプロファイル

ポットに絞ることができるプリズムアレイが優れていることが分かる。

8. おわりに

市販されている単一のLDアレイでCW発振できる出力は20W程度であるが、Quasi-CW発振LDアレイからはパルス幅400μsの発振でピークパワー100W程度の出力が得られる。こうしたLDアレイも密集型のLDアレイ構造をしており、出射光の集光にプリズムアレイがこのまま適用できるであろう。

これまでの実験ではプリズムアレイを多数のプリズム素子を貼り合わせて作製したが、プリズム素子作製時や貼合わせ時の機械精度がLDアレイ

集光時の性能に反映する。貼合わせ面は光学的な意味はないので、1枚のガラス基板からまずV溝アレイ基板を作製し、ついでプリズムアレイを切り出せば、多数のビームをより正確に単一微小スポットに集光できるのであろう。LDアレイの配列ピッチが小さくなるほどV溝アレイによる作製方法が重要になる。さらに半導体製造プロセスを利用することにより、プリズムアレイの機能を有するさらに精度の高い光学素子が作製できるであろう。

参考文献

- 1) S. Yamaguchi and H. Imai: "Array laser-diode end-pumped Nd:YAG laser", Conf. Lasers Electro-Opt., Technical Digest (Optical Society of America, Washington D. C., 1991) p. 492 (paper CFC6).
- 2) S. Yamaguchi and H. Imai: "Efficient Nd:YAG laser end-pumped by a 1 cm aperture laser-diode bar with a GRIN lens array coupling", IEEE J. Quantum Electron., 28, p. 1101 (1992) (Special Issue on Semiconductor Diode-Pumped Solid-State Lasers).
- 3) S. Yamaguchi, K. Chiba, Y. Saito, and T. Kobayashi: "Laser microsoldering of tape-automated bonding leads using an Nd:YAG laser end-pumped by a laser-diode bar with gradient index lens array coupling", Opt. Eng., 35, p. 3585 (1996).
- 4) S. Yamaguchi, T. Kobayashi, Y. Saito, and K. Chiba: "Collimation of emissions from a high-power multistripe laser-diode bar with multiprism array coupling and focusing to a small spot", Opt. Lett., 20, p. 898 (1995).
- 5) S. Yamaguchi, T. Kobayashi, Y. Saito, and K. Chiba: "Efficient Nd:YAG laser end pumped by a high-power multistripe laser-diode bar with multiprism array coupling", Appl. Opt., 35, p. 1430 (1996).
- 6) S. Yamaguchi, T. Kobayashi, Y. Saito, and K. Chiba: "Collimation of emissions from a 1-cm aperture tightly arranged, multistripe laser-diode bar with a multiprism array coupling", Appl. Opt., 36, p. 1875 (1997).